

# استفاده از آزمون‌های استاندارد جهت بررسی واژگونی خودرو در Adams/car

## مطالعه موردی: بررسی تاثیر بار در واژگونی و پایداری یک کامیون سه محوره

علی رحمانی هنزکی<sup>۱</sup>، مهدی فیض اله زاده<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup>استادیار دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

<sup>۲</sup>دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

\*مسئول مکاتبات: feyzollahzade@gmail.com

### چکیده

### واژگان کلیدی

در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار Adams و آزمون‌های استاندارد در آن به تحلیل واژگونی در خودرو پرداخته می‌شود. برای این منظور ابتدا به بررسی عوامل واژگونی در خودرو پرداخته شده و سپس به معرفی آزمون‌های استاندارد مانور واحد، فرمان پله و رانش در نرم‌افزار Adams/car پرداخته می‌شود. پس از آن به بررسی یک مطالعه موردی پرداخته شده و در آن تاثیر بار بر میزان پایداری با استفاده از آزمون‌های فوق در Adams/car بررسی می‌گردد. نتایج مطالعه موردی نشان می‌دهد که حداکثر سرعت برای خودرو مورد مطالعه برای ارضاء نمودن استانداردهای ISO سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت می‌باشد. هرچند در سرعت‌های بالاتر (تا سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت) خودروی فوق دچار واژگونی نمی‌شود اما در سرعت‌های بالاتر از ۶۰ کیلومتر بر ساعت مقادیر حداکثر شتاب جانبی و یا حداکثر زاویه غلت از مقدار استاندارد ISO تجاوز نموده و لذا حداکثر سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت برای خودرو شامل بار در نظر گرفته می‌شود.

### تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۱۵  
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۳۱

### ۱ مقدمه

ارائه دادند و با استفاده از آن آستانه واژگونی در خودروهای شاسی بلند را مورد بررسی قرار دادند [۸].

علی‌چانی یک مدل ریاضی برای خودروهای سواری استخراج کرد و با استفاده از آزمون قلاب ماهی آستانه واژگونی در خودرو را مورد بررسی قرار داد [۲].

استفاده از روابط تئوری نیازمند مدل‌سازی دقیق برای تعیین نتایج صحیح است و این موضوع منجر شده تا روابط تئوری معمولاً با معادلات پیچیده همراه باشد. یکی از روش‌های مرسوم جهت تعیین آستانه واژگونی در خودرو استفاده از ضریب واژگونی است [۹].

این ضریب معمولاً توسط شرکت‌های سازنده ارائه شده و با استفاده از آن می‌توان حداکثر شتاب جانبی خودرو بمنظور جلوگیری از واژگونی را بدست آورد. هرچند این ضریب معمولاً توسط شرکت‌های سازنده برای خودروها مشخص می‌شود اما در حالت کلی این پارامتر نمی‌تواند معیار دقیقی برای بررسی پایداری خودرو باشد [۱۰] [۱۱]. این موضوع زمانی روشن‌تر می‌شود که هدف بررسی میزان پایداری در خودروهای باری باشد. در خودروهای باری، متناسب با بار مورد حمل و موقعیت آن، وزن خودرو و مرکز ثقل آن تغییر کرده و لذا نمی‌توان از این پارامتر که توسط شرکت سازنده ارائه می‌شود جهت بررسی پایداری خودرو استفاده کرد. در این حالت باید میزان پایداری خودرو برای بار اعمالی خاص مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور می‌توان با تحلیل خودرو در سرعت‌های موردنظر، شتاب جانبی و زاویه غلت در خوردو را محاسبه کرده و با مقایسه مقادیر استاندارد که توسط سازمان ISO ارائه می‌شود، میزان پایداری خودرو مورد بررسی قرار گیرد. برای بررسی این

واژگونی<sup>۱</sup> نوعی سانحه رانندگی است که در آن خودرو به سمت سقف یا کنار برمی‌گردد. هرچند عوامل مختلفی در ایجاد واژگونی تاثیر دارند، اما رایج‌ترین دلیل آن سرعت زیاد هنگام دورزدن است [۱].

این سانحه رانندگی هنوز فاقد محافظت لازم برای سرنشین در خودرو است و این موضوع منجر به آن شده تا تحقیقات زمینه تعیین آستانه ی واژگونی در خودرو انجام گیرد. برای مطالعه ی واژگونی می‌بایست شرایط خودرو در آستانه ی واژگونی مورد بررسی قرار گیرد تا سیستم تعلیق و سایر مشخصه‌های خودرو بر اساس آن طراحی شوند [۲].

در این زمینه می‌توان به تحقیقات انجام گرفته توسط ناسان اشاره کرد [۳]. ناسان با انجام آزمون‌های تجربی شرایط مختلف واژگونی در یک خودروی سواری را مورد بررسی قرار داد. اصفهانیان به همراه همکارانش یک اتوبوس O457 را در محیط مجازی مدل‌سازی کردند و با استفاده از صفحه شیب‌دار آستانه واژگونی در خودرو را مورد بررسی قرار دادند [۴].

مانگیاریدنی به همراه همکاران نیز از صفحه شیب‌دار استفاده کردند و پایداری خودرو در شیب را در محیط مجازی مورد مطالعه قرار داده و نتایج حاصل را با آزمون‌های عملی مورد مقایسه قرار دادند [۵].

انجام آزمون‌های تجربی برای تعیین واژگونی در خودرو معمولاً زمان و هزینه زیادی را مصرف کرده و در مراحل اولیه طراحی چندان قابل اجرا نیست. برای این منظور معمولاً محققان از روش‌های تئوری و مدل‌سازی دینامیکی جهت بررسی پایداری و تعیین آستانه واژگونی استفاده می‌کنند [۶] [۷]. مشهدی و مستقیمی یک مدل دینامیکی برای حرکت خودرو روی دو چرخ

هم‌راستا با شتاب جانبی خودرو، پارامتر دیگری که می‌تواند جهت بررسی میزان پایداری خودرو در برابر واژگونی مورد بررسی قرار گیرد زاویه غلتش در خودرو است. در واقع با افزایش شتاب جانبی خودرو زاویه غلت در خودرو نیز افزایش پیدا کرده و خودرو در آستانه واژگونی قرار می‌گیرد. این زاویه با استفاده از رابطه (۲) قابل محاسبه است [۳]:

$$\varphi = \frac{Wh_1(V^2/Rg)}{K_{\varphi f} + K_{\varphi r} - Wh} \quad (2)$$

که در رابطه فوق  $W$  وزن خودرو،  $V$  سرعت خودرو،  $R$  شعاع گردش،  $h$  ارتفاع مرکز ثقل خودرو،  $k_{\varphi f}$  سختی معادل محور جلو،  $k_{\varphi r}$  ثابت گرانش می‌باشد. این زاویه در حالت استاندارد حداکثر بین ۳ تا ۷ درجه می‌باشد که متناسب با خودروی مورد نظر انتخاب می‌گردد.

### ۳ آزمون‌های استاندارد در Adams

نرم‌افزار ادامز یکی از نرم‌افزارهای قدرتمند در زمینه‌ی تحلیل‌های دینامیکی است که با داشتن ماژول‌های مختلف، توانایی انجام انواع تحلیل‌های دینامیکی، ارتعاشی و کنترلی را داراست.

ماژول Adams/car یکی از ماژول‌های پرکاربرد این نرم‌افزار است که جهت تحلیل دینامیکی خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگرچه این ماژول در نسخه‌های ابتدایی، تنها جهت تحلیل دینامیکی خودروهای سواری مورد استفاده قرار می‌گرفت، اما امروزه این ماژول با داشتن محیط Adams/CarTruck توانایی تحلیل دینامیک خودروهای سنگین را داراست و یکی از معتبرترین نرم‌افزار تحلیل خودروهای سنگین محسوب می‌شود.

ماژول Adams/car متناسب با هدف مورد بررسی، آزمون‌های استاندارد مختلفی را مهیار می‌کند. آزمون‌های تحلیل مانور واحد، فرمان پله و رانش از جمله آزمون‌های گروه فرمان در این نرم‌افزار است که می‌تواند جهت بررسی پایداری خودرو مورد استفاده قرار گیرد. در ادامه به معرفی این آزمون‌ها پرداخته می‌شود.

#### ۱.۳ آزمون مانور واحد

در تحلیل مانور واحد خودرو در مسیر مستقیم حرکت کرده و در بخشی از حرکت یک فرمان متقارن توسط راننده به خودرو اعمال می‌شود. این تحلیل برای بررسی میزان فرمان‌پذیری و پایداری خودرو مورد استفاده می‌گیرد [۴]. در این تحلیل پارامترهای طول سیکل<sup>۵</sup>، زاویه فرمان<sup>۶</sup>، سرعت اولیه خودرو<sup>۷</sup>، در مدل‌سازی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند. این پارامترها در شکل ۱ نمایش داده شده است. پارامتر طول سیکل، زمان اعمال فرمان را مشخص می‌کند، با طولانی شدن این زمان، تحلیل مانور واحد می‌تواند جهت تحلیل پایا مورد استفاده قرار گیرد [۵].

زاویه فرمان و سرعت اولیه نیز متناسب با نوع خودرو و شرایط آزمون انتخاب می‌گردد. جدول ۲ سایر پارامترهای مورد استفاده در این تحلیل را مشخص می‌کند.

موضوع می‌توان از مدل‌سازی خودرو در محیط مجازی استفاده کرد. از میان نرم‌افزارهای مجازی، ادامز<sup>۱</sup> یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارها در زمینه مدل‌سازی خودرو محسوب شده و با داشتن محیط‌های مختلف تخصصی خودرو، توانایی شبیه‌سازی در آزمایش‌های مختلف را داراست. در این مقاله با استفاده از ماژول Adams/car میزان پایداری یک کامیون سه محوره مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور ابتدا به بررسی عوامل واژگونی در خودرو پرداخته می‌شود. سپس آزمون‌های استاندارد مانور واحد<sup>۲</sup>، فرمان پله<sup>۳</sup>، رانش<sup>۴</sup>، در نرم‌افزار Adams مورد معرفی قرار می‌گیرد. سپس خودرو مورد نظر در نرم‌افزار مدل‌سازی شده و با استفاده از آزمون‌های فوق آستانه‌ی واژگونی و حداکثر سرعت مجاز با استفاده از آزمون‌های فوق برای خودروی مورد نظر انتخاب می‌شود.

### ۲ عوامل واژگونی در خودرو

عوامل مختلفی در ایجاد واژگونی در خودرو تاثیر دارند. هر عاملی که موجب شود تا گشتاور شتاب عرضی خودرو آنقدر زیاد شود تا بر گشتاور نیروی عمودی تیرها غلبه کند موجب بازگوش می‌شود [۱]. شیب کناری جاده، افزایش شتاب جانبی خودرو، خاکریزهای کنار جاده، پیچ‌های خطرناک، تعویض و جایجایی بار، تغییر مسیر و انحراف ناگهانی از جمله مواردی هستند که موجب واژگونی در خودرو می‌شوند [۲].

در تمام موارد ذکر شده آنچه موجب واژگونی می‌شود افزایش شتاب جانبی خودرو است. بنابراین شتاب جانبی خودرو می‌تواند پارامتری مناسب جهت بررسی میزان مقاومت خودرو در برابر واژگونی باشد. از طرفی ابعاد خودرو نیز تاثیر زیادی در واژگونی دارد. هرچه فاصله گام خودرو بیشتر باشد مقاومت بیشتری نسبت به افزایش شتاب جانبی خواهد داشت.

$$\beta = \frac{t}{2h} \quad (1)$$

در بیشتر موارد می‌توان آستانه واژگونی در خودرو را با استفاده از رابطه (۱) مورد بررسی قرار داد [۱]: پارامتر  $\beta$  که تنها با دو رابطه فاصله گام خودرو ( $t$ ) و ارتفاع مرکز ثقل خودرو ( $h$ ) مشخص می‌شود بیانگر میزان مقاومت خودرو در برابر واژگونی است. این نسبت هرچقدر بزرگتر باشد خودرو مورد نظر مقاومت بیشتری در برابر واژگونی داراست. جدول ۱ نمونه‌ای از پارامتر فوق و آستانه واژگونی بر حسب شتاب جانبی را برای چند خودروی نمونه نشان می‌دهد. همانطور که از جدول فوق مشخص است معمولاً با این دو پارامتر ساده می‌توان میزان پایداری خودرو را محاسبه کرد.

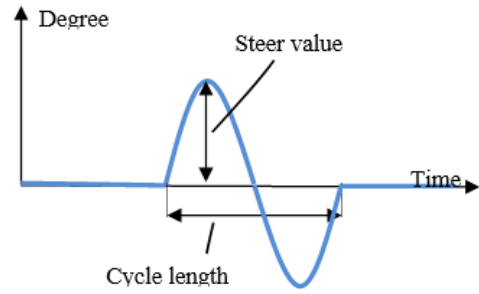
جدول ۱: ویژگی‌های مرتبط با واژگونی در خودروهای مختلف [۱]

نوع خودرو	ارتفاع مرکز ثقل (in)	فاصله گام (in)	آستانه واژگونی (g)
مسابقه ای	۱۸-۲۰	۵۰-۶۰	۱/۷-۱/۲
فشرده	۲۰-۲۳	۵۰-۶۰	۱/۵-۱/۱
تشریفاتی	۲۰-۲۴	۶۰-۶۵	۱/۶-۱/۲
کامیون سبک	۳۰-۳۵	۶۵-۷۰	۱/۱-۰/۹
ون سواری	۳۰-۴۰	۶۵-۷۰	۱/۱-۰/۸
کامیون متوسط	۴۵-۵۵	۶۵-۷۵	۰/۸-۰/۶
کامیون سنگین	۶۰-۸۵	۷۰-۷۲	۰/۶-۰/۴

<sup>1</sup>MSC. Adams <sup>2</sup>Single lane change <sup>3</sup>Step Steer <sup>4</sup>Drift <sup>5</sup>Cycle length <sup>6</sup>Steer value <sup>7</sup>Initial velocity

جدول ۳: پارامترهای شبیه سازی در آزمون فرمان پله

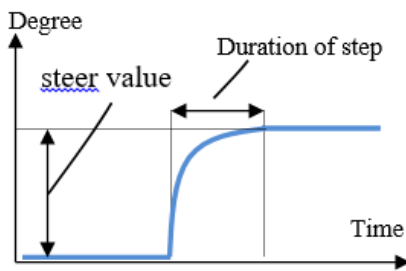
در این قسمت نام مدل وارد می شود.	Full Vehicle Assembly
در این قسمت نام فایل های خروجی از تحلیل وارد می شود.	Output Prefix
زمان پایان شبیه سازی را مشخص می کند.	End Time
تعداد گام را مشخص می کند.	Number Of Step
نوع جاده برای تحلیل را مشخص می کند.	Road Data File
سرعت اولیه را مشخص می کند.	Internal Velocity
حالت دنده در خودرو را مشخص می کند.	Gear Position
زاویه نهایی فرمان را مشخص می کند.	Final Steer Value
زمان شروع شبیه سازی را مشخص می کند.	Step Steer Time
طول زمان پله را مشخص می کند	Duration Of Step
نوع ورودی فرمان را مشخص می کند که نیرو، گشتاور و یا زاویه باشد.	Steering Input



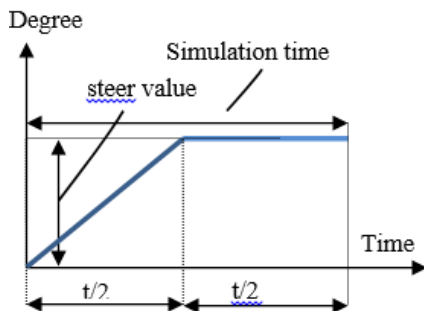
شکل ۱: پارامترهای شبیه سازی در تحلیل مانور واحد

جدول ۲: پارامترهای شبیه سازی در تحلیل مانور واحد

در این قسمت نام مدل وارد می شود.	Full Vehicle Assembly
در این قسمت نام فایل های خروجی از تحلیل وارد می شود.	Output Prefix
زمان پایان شبیه سازی را مشخص می کند.	End Time
تعداد گام را مشخص می کند. با افزایش تعداد گام دقت نتایج افزایش و همچنین زمان تحلیل نیز افزایش می یابد	Number Of Step
نوع جاده برای تحلیل را مشخص می کند.	Road Data File
سرعت اولیه را مشخص می کند.	Internal Velocity
حالت دنده در خودرو را مشخص می کند.	Gear Position
حداکثر زاویه فرمان را مشخص می کند.	Steer Value Maximum
طول سیکل فرمان را مشخص می کند	Cycle Length
نوع ورودی فرمان را مشخص می کند.	Steering Input



شکل ۲: پارامترهای شبیه سازی در آزمون فرمان پله



شکل ۳: پارامترهای شبیه سازی در آزمون رانش

همچنین در جدول ۴ نیز سایر پارامترهای موجود در این شبیه سازی نمایش داده شده است.

جدول ۴: پارامترهای شبیه سازی در آزمون رانش

در این قسمت نام مدل وارد می شود.	Full Vehicle Assembly
در این قسمت نام فایل های خروجی از تحلیل وارد می شود.	Output Prefix
زمان پایان شبیه سازی را مشخص می کند. که در پروژه حاضر ۱۵ ثانیه می باشد	End Time
تعداد گام را مشخص می کند.	Number Of Step
نوع جاده برای تحلیل را مشخص می کند.	Road Data File
سرعت اولیه را مشخص می کند.	Internal Velocity
حالت دنده در خودرو را مشخص می کند.	Gear Position
زاویه فرمان را مشخص می کند.	Steer Value
نوع ورودی فرمان را مشخص می کند که نیرو، گشتاور و یا زاویه باشد.	Steering Input

### ۲.۳ آزمون فرمان پله

در آزمون فرمان پله خودرو در مسیر مستقیم حرکت کرده و در بخشی از حرکت یک فرمان ناگهانی به خودرو اعمال می شود. بنابراین، این تحلیل می تواند برای بررسی پاسخ گذرا و پایداری خودرو مورد استفاده قرار گیرد [۵]. باید توجه داشت که آزمون فرمان پله با تحلیل مانور واحد متفاوت است. در تحلیل مانور واحد همانطور که در قسمت قبل بیان شد، ورودی فرمان در انتهای کورس به حالت اولیه بر می گردد. در صورتی که در تحلیل فرمان پله راننده فرمان را در زاویه ورودی نگه می دارد. در آزمون فرمان پله پارامترهای زمان پله<sup>۱</sup>، زاویه فرمان و سرعت اولیه خودرو در مدل سازی از اهمیت بالایی برخوردار می باشند. این پارامترها در شکل ۲ نمایش داده شده است. همچنین در جدول ۳ نیز سایر پارامترهای موجود در این شبیه سازی نمایش داده شده است.

### ۳.۳ آزمون رانش

آزمون رانش جهت بررسی حرکت خودرو در حالت پایا مورد استفاده قرار می گیرد. در این حالت در حین زمان شبیه سازی، نرم افزار بخشی از زمان تحلیل را صرف تغییرات زاویه فرمان و زمان باقی مانده را صرف حرکت پایا خودرو می کند (شکل ۳). نرم افزار Adams/car حداقل زمان برای این تحلیل را ۱۰ ثانیه معرفی می کند. در آزمون رانش پارامترهای زمان شبیه سازی، زاویه فرمان و سرعت اولیه خودرو در مدل سازی از اهمیت بالایی برخوردار می باشند. این پارامترها در شکل ۴ نمایش داده شده است.

<sup>1</sup>Duration of step

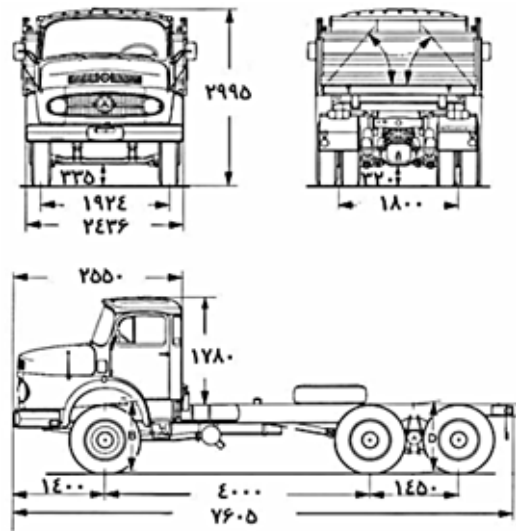
## ۴ مطالعه موردی

جدول ۵: مشخصات جرم های مختلف در خودرو

	جرم kg	Ixx kg m <sup>2</sup>	Iyy kg m <sup>2</sup>	Izz kg m <sup>2</sup>
موتور	G1	۸۸۰	۶/۳۰ e۷	۱/۴ e۸
کابین	G2	۶۰۰	۱۰۰	۱/۰۰ e۲
جعبه روغن	G3	۸۱۵۲	۳/۳۳ e۱۰	۲/۲۹ e۹
محافظ	G4	۲۰۰۰	۵/۰۰ e۸	۵/۰۰ e۸
بار	G5	۴۱۰۵	۲/۰۰ e۹	۲/۰۰ e۹
بار	G6	۲۰۰۰	۵/۰۰ e۸	۵/۰۰ e۸
صفحه کف	G7	۵۳۷۰	۴/۹۰ e۱۰	۴/۵۰ e۱۰
شاسی	G8	۷۶۸	۲/۹۶ e۱۰	۱/۱ e۹
مخزن هوا	G9	۵۰۰	۵/۰۰ e۷	۲/۰۰ e۸
صفحه شیب	G10	۱۲۰۰	۲/۳۰ e۹	۲/۶۰ e۹
بار	G11	۶۳۵	۵/۰۰ e۷	۵/۰۰ e۷
بار	G12	۶۳۵	۵/۰۰ e۷	۵/۰۰ e۷
بار	G13	۶۳۵	۵/۰۰ e۷	۵/۰۰ e۷
محور	G14	۵۶۰	۴/۸۰ e۷	۲/۷۰ e۶
محور	G15	۸۱۸	۱/۵۰ e۷	۲/۰۰ e۷
محور	G16	۸۱۸	۱/۵۰ e۷	۲/۰۰ e۷

### ۱.۴ آشنایی با مدل و بار مورد نصب

خودرویی که در مقاله حاضر مورد تحلیل و بررسی قرار خواهد گرفت کامیون سه محوره ساخت شرکت ایران خودرو دیزل است که با نام تجاری LK 2624/4000(6×4) شناخته می شود. سیستم تعلیق جلو و سیستم تعلیق عقب آن از نوع فنر برگی می باشد. در شکل ۴ نمایی از آن آورده شده است. همچنین شکل ۵ نمایی از مشخصات جرمی خودروی مورد نظر به همراه بار نصب شده و جدول ۵ نیز مشخصات جرم های مختلف را نشان می دهد.

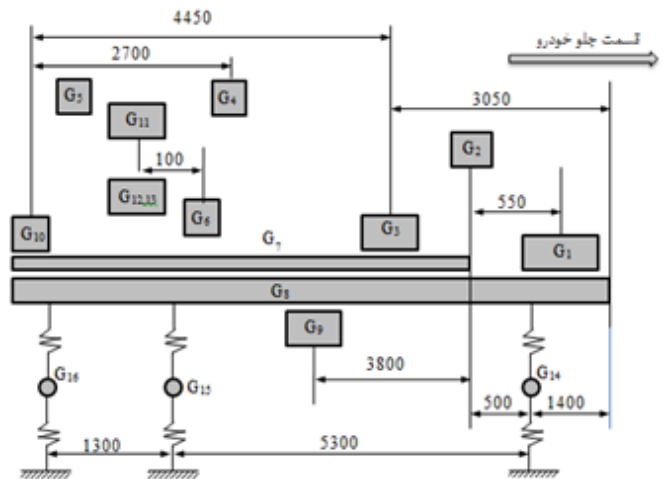


شکل ۴: نمایی از خودرو سه محوره LK 2624/4000(6×4)

حرفه ای در نرم افزار ساخته شده است. بسیاری از مدل های معروف از قسمت های مختلف خودروها نظیر: سیستم تعلیق مک فرسون، میله های ضد چرخش، سیستم فرمان شانه ای، شاسی خودرو، انواع تایرها و ... توسط شرکت سازنده نرم افزار ساخته شده و به شکل الگو همراه با نرم افزار ارائه شده است. الگوها کاملاً پارامتری بوده و قابل ویرایش هستند. در صورتی که سیستم مورد نظر در طراحی در میان مدل های ارائه شده نرم افزار نباشد می توان مدل مورد نظر را با استفاده از الگوساز ساخت و به شکل الگو ذخیره کرد. پس از ویرایش و یا ساخت الگوها، آن ها را برای مونتاژ به شکل زیرسیستم در آورده می شود. بنابراین زیرسیستم ها مدل هایی بر پایه الگوها هستند. پس از ساخت زیرسیستم ها آن ها را متناسب با نوع تحلیل مونتاژ کرده تا مدل نهایی ساخته شود. در نهایت با ساخت مدل مونتاژ می توان تحلیل و مدل سازی را در Adams/car شروع کرد. در این مقاله، جهت آماده سازی مدل کامل خودرو، در برخی از قسمت ها، الگو به صورت کامل ساخته شده و در برخی از قسمت ها نیز از الگوهای آماده استفاده شده است و تنها الگوهای آماده ویرایش شده اند. برای مثال کابین خودرو، شاسی و ... از جمله قسمت هایی هستند که به شکل الگوی جدید ساخته شده اند و الگوهای سیستم تعلیق، ترمز، فرمان و ... تنها ویرایش شده اند. در شکل ۶ مدل کامل خودرو به همراه زیرسیستم ها نمایش داده شده است.

### ۳.۴ آزمون ها و تحلیل

در این قسمت با استفاده از آزمون های استاندارد مانور واحد، فرمان پله و رانش میزان پایداری و مقاومت کامیون سه محوره در برابر واژگونی مورد بررسی قرار می گیرد. برای خودروی فوق حداکثر شتاب جانبی قابل قبول طبق استاندارد ISO 14793 [۶]، ۳ متر بر مجذور ثانیه و حداکثر زاویه غلت ۷ درجه در نظر گرفته شده است. بنابراین با استفاده از مقادیر فوق و آزمون های استاندارد در حداکثر سرعت می توان پایداری خودرو را در Adams/car مورد بررسی قرار داد. برای این منظور برای آزمون مانور واحد زمان شبیه سازی ۲ ثانیه، زاویه فرمان ۹۰ درجه و سرعت خودرو در سه ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت

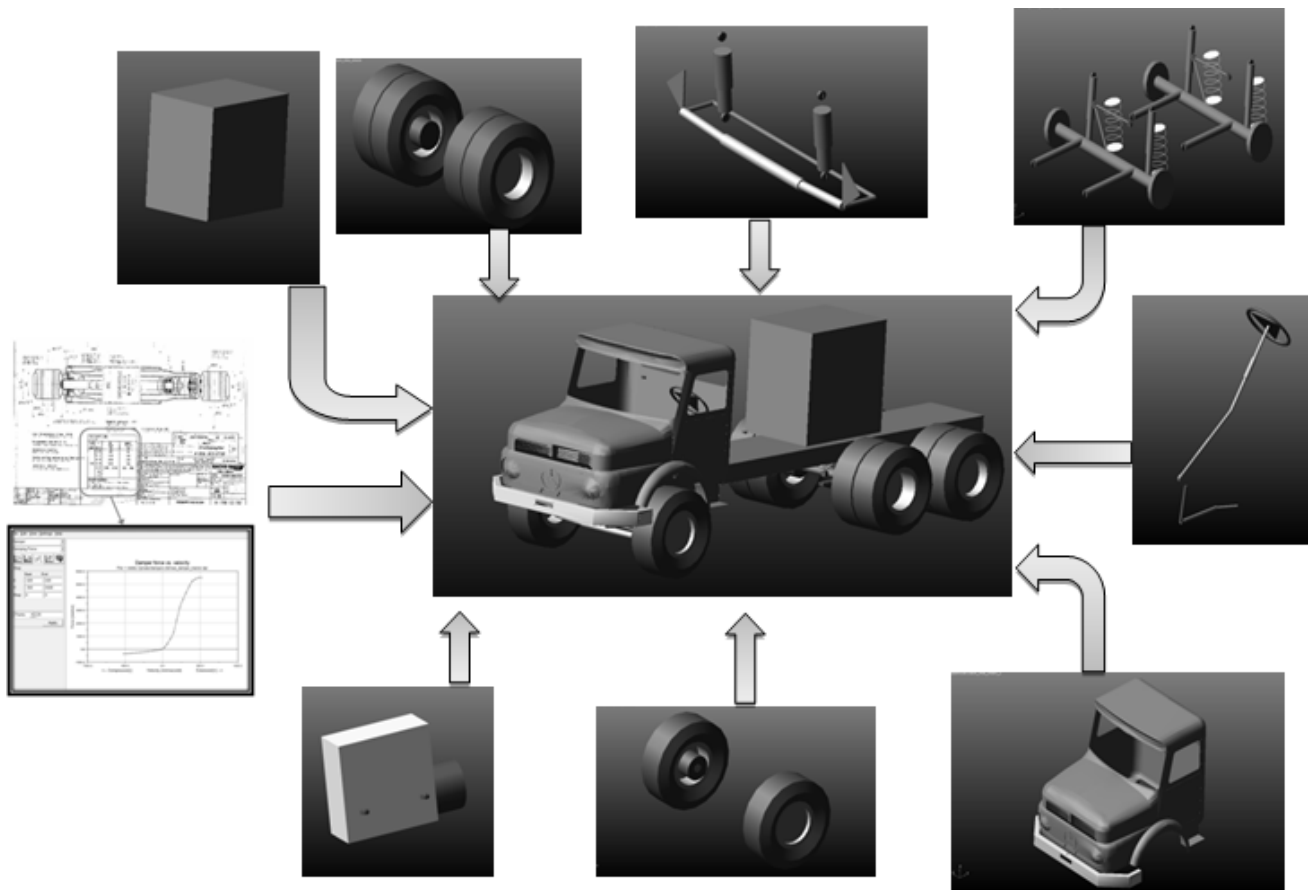


شکل ۵: مشخصات جرمی خودروی مورد نظر به همراه بار نصب شده

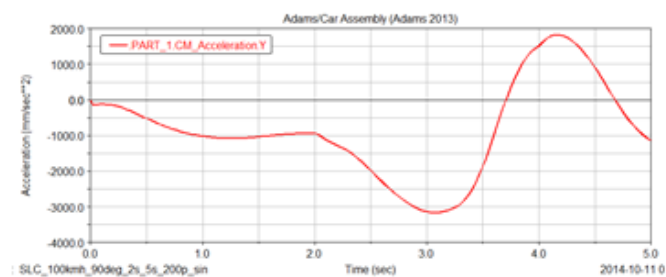
### ۲.۴ مدل سازی در Adams/car

در نرم افزار Adams/car اولین قدم در تحلیل، ساخت و آماده سازی مدل است که از سه مرحله ای: ایجاد الگو، ایجاد زیرسیستم ها<sup>۲</sup> و مونتاژ زیرسیستم ها<sup>۳</sup> تشکیل شده است. الگوها مدل هایی هستند که توسط اشخاص

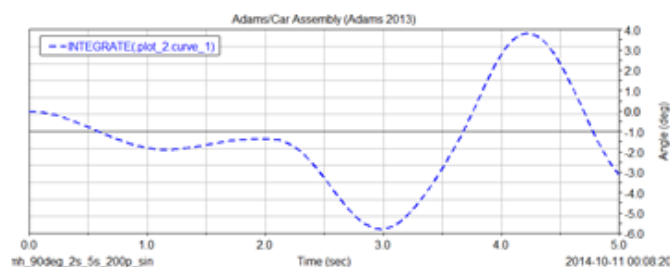
<sup>1</sup>Template    <sup>2</sup>Subsystems    <sup>3</sup>Assembly



شکل ۶: مدل کامل خودرو به همراه زیر سیستم ها



شکل ۷: تغییرات شتاب جانبی خودرو در تحلیل SLC و در سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت

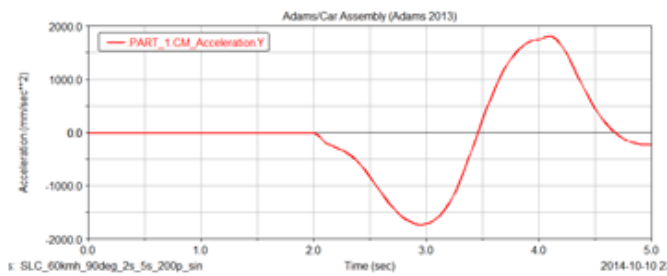


شکل ۸: تغییرات زاویه غلت خودرو در تحلیل SLC و در سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت

در اشکال ۱۶ و ۱۷ تغییرات شتاب جانبی و تغییرات زاویه غلت خودرو در آزمون فرمان واحد و در سرعت ۹۰ کیلومتر ترسیم شده است. از شکل ۱۶ می توان دریافت که حداکثر شتاب جانبی خودرو در سرعت ۹۰ کیلومتر

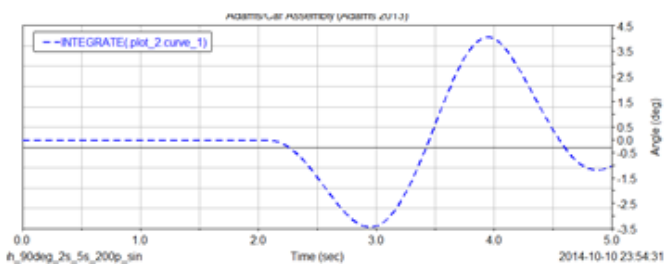
در نظر گرفته شده است. برای بررسی میزان پایداری خودرو ابتدا خودرو با حداکثر سرعت با آزمون مانور واحد مورد آزمایش قرار می گیرد. برای این منظور در اشکال ۸ و ۷ تغییرات شتاب جانبی و تغییرات زاویه غلت خودرو در آزمون مانور واحد و در سرعت ۱۰۰ کیلومتر ترسیم شده است. از شکل ۷ می توان دریافت که حداکثر شتاب جانبی خودرو در سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت برابر با ۵.۳ متر بر مجذور ثانیه است که این مقدار از میزان شتاب جانبی استاندارد برای خودرو کمی بیشتر است. همچنین با بررسی شکل ۸ نیز می توان دریافت که حداکثر زاویه غلت خودرو حدود ۶- درجه است. اگرچه این زاویه در بازه ی استاندارد قرار داد اما شتاب جانبی برای خودروی موردنظر بیش از مقدار استاندارد است و لذا سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت نمی تواند سرعت مجاز برای خودرو در آزمون مانور واحد باشد.

برای بررسی دقیق تر نتایج، در شکل ۱۴ تغییرات شتاب جانبی خودرو و در شکل ۱۵ تغییرات شتاب جانبی خودرو به همراه نیروی عمودی تایلر در در سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت ترسیم شده است. از شکل ۱۴ می توان دریافت که خودرو در شتاب جانبی حدود ۴ متر بر مجذور ثانیه دچار واژگونی شده که این موضوع بر اساس استاندارد ISO نیز قابل پیش بینی می باشد. همچنین با ترسیم هم زمان نیروی عمودی تایلر و شتاب جانبی خودرو در یک صفحه شکل ۱۵ می توان دریافت که نیروی عمودی تایلر حدوداً چند ثانیه قبل از واژگونی خودرو مقداری برابر با صفر داشته که این موضوع صحت مدل سازی در Adams/car را بیان می کند.

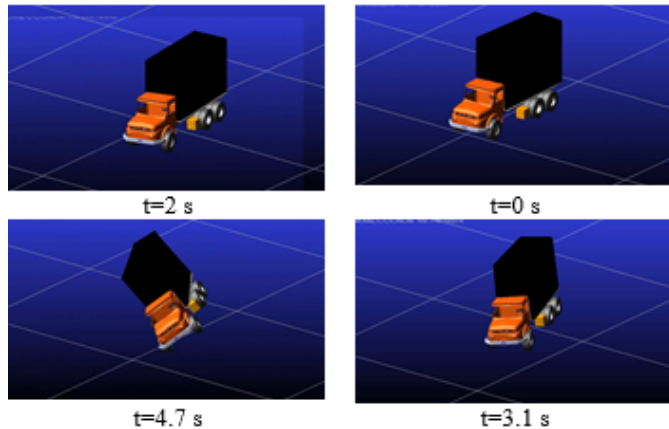


شکل ۱۱: تغییرات شتاب جانبی خودرو در تحلیل SLC و در سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت

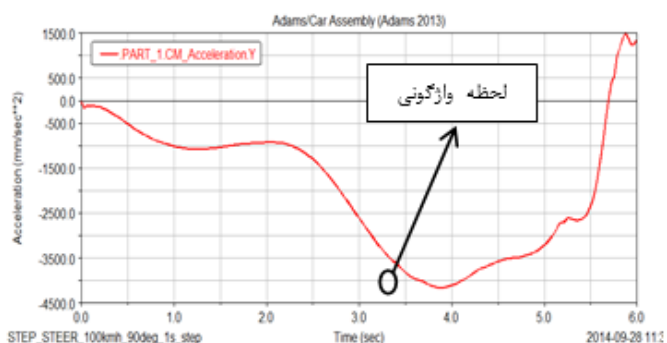
بر ساعت انتخاب می‌گردد. با استفاده از پارامترهای بیان شده در شبیه‌سازی در سرعت ۱۰۰ کیلومتر، خودرو در تحلیل فرمان پله دچار واژگونی شده شکل ۱۳ و لذا سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت برای بیشترین سرعت شبیه‌سازی در نظر گرفته شد.



شکل ۱۲: تغییرات زاویه غلت خودرو در تحلیل SLC و در سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت

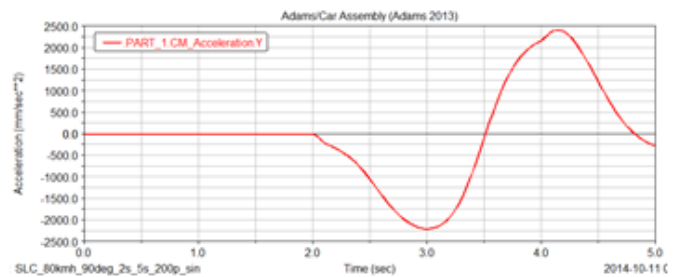


شکل ۱۳: نمایش حرکت خودرو در سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت در زمان‌های مختلف

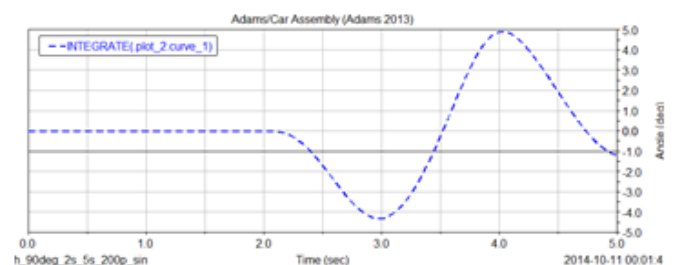


شکل ۱۴: تغییرات شتاب جانبی خودرو در آزمون فرمان پله و در سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت

بر ساعت برابر با ۳.۸ متر بر مجذور ثانیه است که این مقدار از میزان شتاب جانبی استاندارد برای خودرو بیشتر است. همچنین با بررسی شکل ۱۷ می‌توان دریافت که حداکثر زاویه غلت خودرو حدود ۱۰- درجه است که این مقدار نیز از حداکثر زاویه استاندارد بیشتر بوده و لذا سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت نمی‌تواند سرعت مجاز برای خودرو در آزمون فرمان پله باشد. برای بررسی سرعت مجاز در آزمون مانور واحد، این بار تحلیل در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت انجام گرفته و نتایج حاصل در اشکال ۹ و ۱۰ برای تغییرات شتاب جانبی و تغییرات زاویه غلت خودرو نمایش داده شده است. از شکل ۹ می‌توان دریافت که حداکثر شتاب جانبی خودرو برابر با ۵/۲ متر بر مجذور ثانیه است که این مقدار کمتر از شتاب جانبی استاندارد برای خودرو می‌باشد. همچنین با بررسی شکل ۱۰ نیز می‌توان دریافت که حداکثر زاویه غلت خودرو حدود ۵ درجه است که این زاویه نیز کمتر از میزان استاندارد برای خودرو است و لذا سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت می‌تواند سرعت مجاز برای خودرو در آزمون مانور واحد باشد. برای بررسی میزان ضریب اطمینان از عملکرد خودرو در آزمون مانور واحد در ادامه به بررسی میزان شتاب جانبی و زاویه غلت خودرو در سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت پرداخته شده است. برای این منظور نتایج حاصل در اشکال ۱۱ و ۱۲ نمایش داده شده است. همانطور که از اشکال فوق مشخص است حداکثر شتاب جانبی خودرو کمتر از ۲ متر بر مجذور ثانیه و حداکثر زاویه غلت خودرو نیز کمتر از ۴ درجه می‌باشد. بنابراین سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت در آزمون مانور واحد می‌تواند با ضریب اطمینان حدوداً ۱/۲ مورد استفاده قرار گیرد.



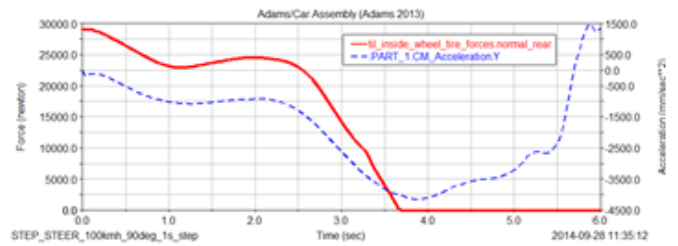
شکل ۹: تغییرات شتاب جانبی خودرو در تحلیل SLC و در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت



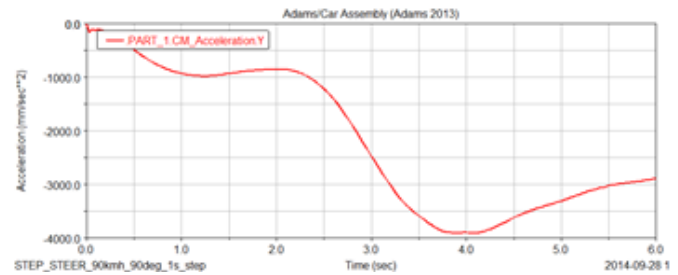
شکل ۱۰: تغییرات زاویه غلت خودرو در تحلیل SLC و در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت

در ادامه جهت بررسی میزان پایداری خودرو در حالت گذرا از تحلیل Step Steer استفاده می‌گردد. برای این منظور، زمان شبیه‌سازی ۱ ثانیه، زاویه فرمان ۹۰ درجه و سرعت خودرو در سه سرعت ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده است. مشابه آزمون قبل ابتدا سرعت ۱۰۰ کیلومتر

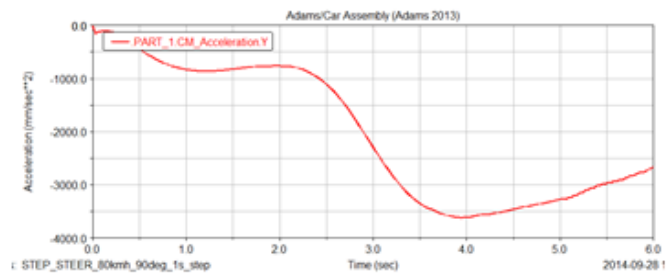
می‌تواند سرعت مجاز برای خودرو در آزمون فرمان پله باشد. در ادامه جهت بررسی میزان پایداری خودرو در حالت پایا از آزمون رانش استفاده می‌گردد. برای این منظور، زمان شبیه سازی ۱۵ ثانیه، زاویه فرمان ۹۰ درجه و سرعت اولیه خودرو در سه سرعت ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده‌است. مشابه آزمون قبل ابتدا سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت انتخاب می‌گردد. با استفاده از پارامترهای بیان شده در شبیه‌سازی در سرعت ۱۰۰ کیلومتر، خودرو در آزمون رانش دچار واژگونی شده و لذا سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت برای بیشترین سرعت شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. برای بررسی دقیق‌تر نتایج، در اشکال ۲۲ و ۲۳ تغییرات شتاب جانبی و تغییرات زاویه غلت خودرو در آزمون رانش و در سرعت ۹۰ کیلومتر ترسیم شده‌است.



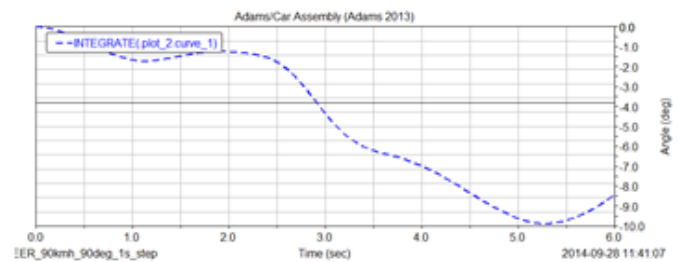
شکل ۱۵: ترسیم هم‌زمان شتاب جانبی خودرو به همراه نیروی عمودی تایر در آزمون فرمان پله و در سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت



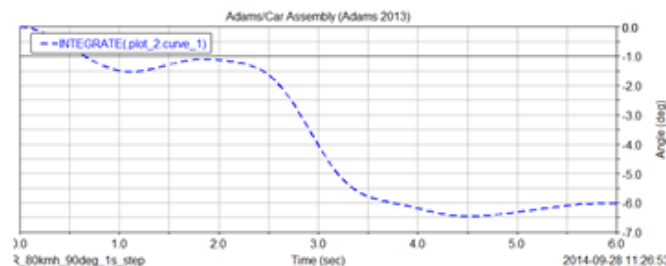
شکل ۱۶: تغییرات شتاب جانبی خودرو در آزمون فرمان پله و در سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت



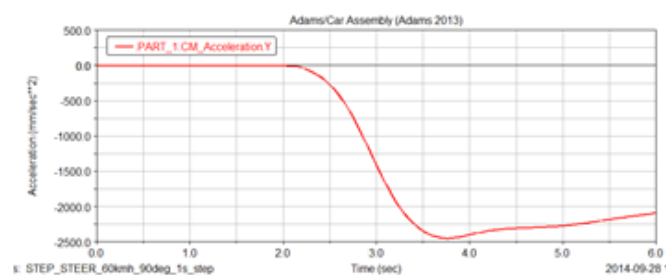
شکل ۱۸: تغییرات شتاب جانبی خودرو در آزمون فرمان پله و در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت



شکل ۱۷: تغییرات زاویه غلت خودرو در آزمون فرمان پله و در سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت

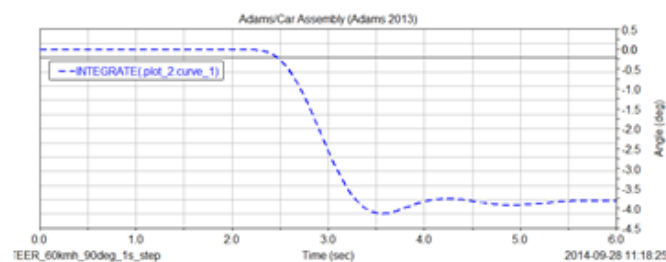


شکل ۱۹: تغییرات زاویه غلت خودرو در آزمون فرمان پله و در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت



شکل ۲۰: تغییرات شتاب جانبی خودرو در آزمون فرمان پله و در سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت

برای بررسی سرعت مجاز در آزمون فرمان پله، تحلیل در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت انجام گرفته و نتایج حاصل در اشکال ۱۸ و ۱۹ برای تغییرات شتاب جانبی و تغییرات زاویه غلت خودرو نمایش داده شده‌است. از شکل ۱۸ می‌توان دریافت که حداکثر شتاب جانبی خودرو برابر با ۳/۵ متر بر مجذور ثانیه است که این مقدار از حداکثر زاویه استاندارد بیشتر می‌باشد. همچنین با بررسی شکل ۱۹ نیز می‌توان دریافت که حداکثر زاویه غلت خودرو حدود ۶/۵ درجه است که این زاویه کمتر از میزان استاندارد برای خودرو است. بنابراین سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت نیز نمی‌تواند سرعت مجاز برای خودرو در آزمون فرمان پله باشد و لذا تحلیل باید در سرعت پایین‌تر انجام گیرد.



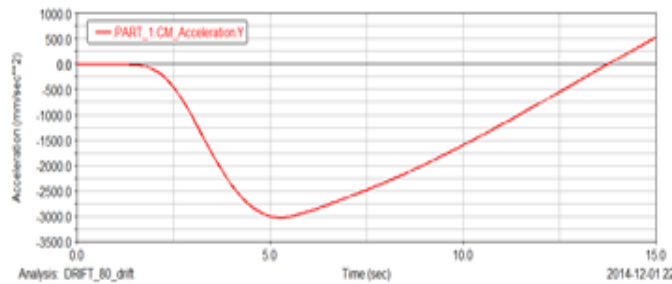
شکل ۲۱: تغییرات زاویه غلت خودرو در آزمون فرمان پله و در سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت

در اشکال ۲۰ و ۲۱ تغییرات شتاب جانبی و تغییرات زاویه غلت خودرو در آزمون فرمان پله و در سرعت ۶۰ کیلومتر ترسیم شده است. از شکل ۲۰ می‌توان دریافت که حداکثر شتاب جانبی خودرو در سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت برابر با ۵.۲ متر بر مجذور ثانیه است که این مقدار از میزان شتاب جانبی استاندارد برای خودرو کمتر است. همچنین با بررسی شکل ۲۱ می‌توان دریافت که حداکثر زاویه غلت خودرو حدود ۴ درجه است که این مقدار نیز از حداکثر زاویه استاندارد خودرو کمتر بوده و لذا سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت

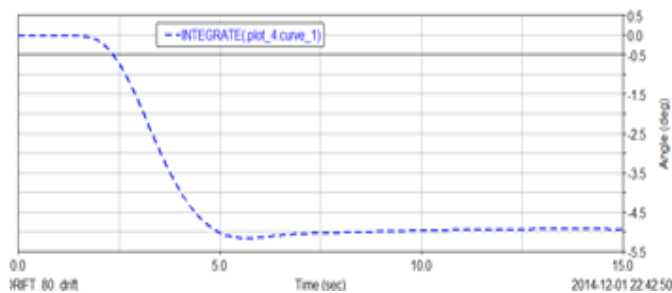
استاندارد، نتایج حاصل از تحلیل‌ها در سه گروه رنگ سبز، قرمز و نارنجی مشخص شده‌است.

رنگ قرمز بیانگر تحلیل‌هایی است که خودرو در این تحلیل واژگونی می‌شود. رنگ نارنجی شامل تحلیل‌هایی است که خودرو دچار ناپایداری و واژگونی نشده اما مقادیر شتاب جانبی و یا مقادیر حداکثر زاویه غلت بیشتر از مقدار استاندارد می‌باشد.

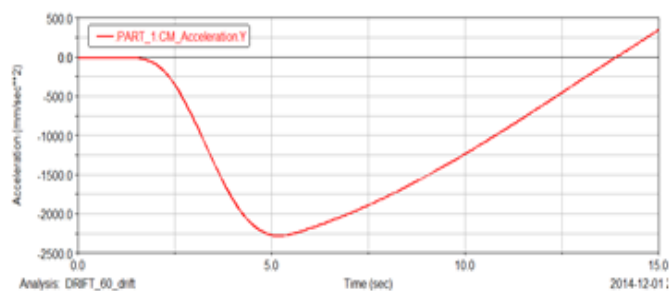
رنگ سبز نیز بیانگر تحلیلی است که در آن حداکثر شتاب جانبی و حداکثر زاویه غلت خودرو کمتر از مقادیر استاندارد می‌باشد. با بررسی مقادیر موجود در جدول ۶ می‌توان دریافت که حداکثر سرعت خودرو برای برآورده نمودن استانداردهای ISO سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت می‌باشد. اگرچه خودرو در سرعت‌های بالاتر (تا سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت) هم دچار واژگونی نمی‌شود اما در سرعت‌های بالاتر از ۶۰ کیلومتر بر ساعت مقادیر حداکثر شتاب جانبی و یا حداکثر زاویه غلت از مقدار استاندارد تجاوز نموده و لذا حداکثر سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت برای خودرو شامل بار در نظر گرفته می‌شود.



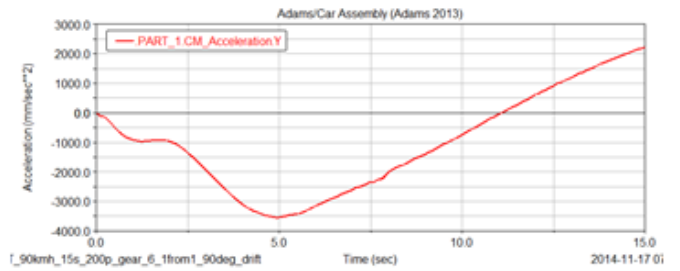
شکل ۲۲: تغییرات شتاب جانبی خودرو در درآزمون رانش و در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت



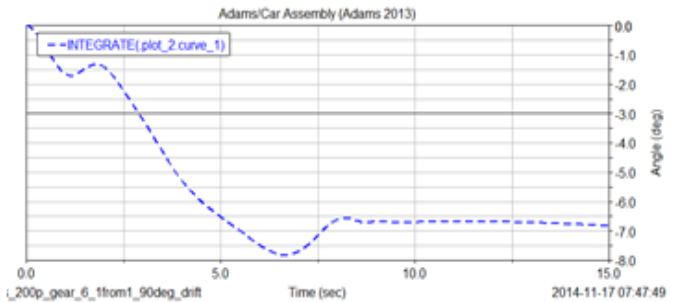
شکل ۲۳: تغییرات زاویه غلت خودرو در درآزمون رانش و در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت



شکل ۲۴: تغییرات شتاب جانبی خودرو در درآزمون رانش و در سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت



شکل ۲۲: تغییرات شتاب جانبی خودرو در آزمون رانش و در سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت



شکل ۲۳: تغییرات زاویه غلت خودرو در درآزمون رانش و در سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت

از شکل ۲۲ می‌توان دریافت که حداکثر شتاب جانبی خودرو در سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت برابر با  $\frac{3}{8}$  متر بر مجذور ثانیه است که این مقدار از میزان شتاب جانبی استاندارد برای خودرو بیشتر است. همچنین با بررسی شکل ۲۳ می‌توان دریافت که حداکثر زاویه غلت خودرو حدود ۸- درجه است که این مقدار نیز از حداکثر زاویه استاندارد بیشتر بوده و لذا سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت نمی‌تواند مجاز برای خودرو در آزمون رانش باشد. برای بررسی سرعت مجاز در آزمون رانش، تحلیل در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت انجام گرفته و نتایج حاصل در اشکال ۲۴ و ۲۵ برای تغییرات شتاب جانبی و تغییرات زاویه غلت خودرو نمایش داده شده‌است. از شکل ۲۴ می‌توان دریافت که حداکثر شتاب جانبی خودرو برابر با ۲.۳ متر بر مجذور ثانیه است که این مقدار کمی از حداکثر زاویه استاندارد بیشتر می‌باشد. همچنین با بررسی شکل ۲۵ نیز می‌توان دریافت که حداکثر زاویه غلت خودرو حدود ۵ درجه است که این مقدار در حد استاندارد برای خودرو فوق می‌باشد. در اشکال ۲۶ و ۲۷ تغییرات شتاب جانبی و تغییرات زاویه غلت خودرو در آزمون رانش و در سرعت ۶۰ کیلومتر ترسیم شده‌است. از شکل ۲۶ می‌توان دریافت که حداکثر شتاب جانبی خودرو در سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت برابر با  $\frac{2}{2}$  متر بر مجذور ثانیه است که این مقدار از میزان شتاب جانبی استاندارد برای خودرو کمتر است. همچنین با بررسی شکل ۲۷ می‌توان دریافت که حداکثر زاویه غلت خودرو حدود  $\frac{3}{5}$  درجه است که این مقدار نیز از حداکثر زاویه استاندارد خودرو کمتر بوده و لذا سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت می‌تواند مجاز برای خودرو در آزمون رانش باشد.

برای بررسی دقیق‌تر نتایج و انتخاب سرعت مجاز جهت پایداری خودرو، در جدول ۶ نتایج حاصل از سه آزمون انجام گرفته و برای سرعت‌های مختلف نمایش داده شده‌است. برای این منظور در جدول فوق حداکثر زاویه غلت و حداکثر شتاب جانبی برای هر یک از تحلیل‌ها آورده شده و متناسب با مقادیر



[3] Rose, Nathan A, Kineticorp, LLC, and Beauchamp, Gray. Reconstruction and analysis of rollover crashes of light vehicles. 2017.

[۴] اصفهانیان، محسن، کبیری، ضیائی راد، سعید. شبیه سازی آزمون واژگونی اتوبوس ۵۴۵۷ اصلاح سازه آن به منظور ارضای شرایط آزمون. روش های عددی در مهندسی، بهمن ۱۳۸۹.

[5] Mongiardini, M, Grzebieta, RH, Mattos, GA, and Bambach, MR. Computer modelling of vehicle rollover crash tests conducted with the unsw jordan rollover system. *International journal of crashworthiness*, 21(3):173-190, 2016.

[6] Richardson, SA, Rechnitzer, G, Grzebieta, Raphael H, and Hoareau, Effie. An advanced methodology for estimating vehicle rollover propensity. *International journal of crashworthiness*, 8(1):63-72, 2003.

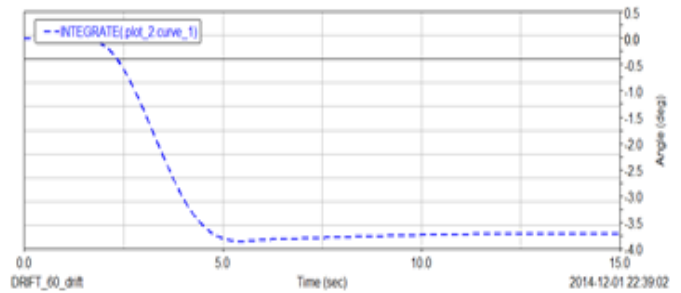
[7] Li, Yinong, Sun, Wei, Huang, Jingying, Zheng, Ling, and Wang, Yanyang. Effect of vertical and lateral coupling between tyre and road on vehicle rollover. *Vehicle System Dynamics*, 51(8):1216-1241, 2013.

[۸] حمید، مشهدی، بهروز، مستقیمی. تعیین آستانه چپ شدن خودروهای شاسی بلند با استفاده از مدل سازی دینامیک آن در زمان حرکت روی دو چرخ. پایان نامه کارشناسی ارشد، صفحات ۴۵-۵۶، آذر ۱۳۹۳.

[9] Gillespie, Thomas D. Fundamentals of vehicle dynamics. warrendale, pa: Society of automotive engineers, 1992.

[10] Terhune, KW. *A Comparison of Light Truck and Passenger Car Occupant Protection in Single-vehicle Crashes*. 1986.

[11] Ajluni, Karen K. Rollover potential of vehicle on embankments, sideslopes, and other roadside features. *Public Roads*, 52(4), 1989.



شکل ۲۷: تغییرات زاویه غلت خودرو در در آزمون رانش و در سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت

جدول ۶: مقایسه نتایج حاصل از آزمون های مختلف

آزمون	سرعت	نتیجه بر مبنای حداکثر شتاب جانبی		نتیجه بر مبنای حداکثر زاویه غلت	
		حداکثر شتاب جانبی	حداکثر زاویه غلت	حداکثر شتاب جانبی	حداکثر زاویه غلت
Single lane change	۱۰۰	×	×	×	×
	۸۰	×	×	×	×
	۶۰	✓	✓	✓	✓
Step Steer	۱۰۰	×	×	×	×
	۹۰	×	×	×	×
	۸۰	×	×	×	×
Drift	۱۰۰	×	×	×	×
	۹۰	×	×	×	×
	۸۰	×	×	×	×
	۶۰	✓	✓	✓	✓

استاندارد ISO فراهم می شود.   
 خودرو دچار واژگونی نمی شود: اما   
 استاندارد ISO فراهم نمی شود.   
 خودرو دچار واژگونی نمی شود.

## ۵ نتیجه گیری

در این مقاله آزمون های استاندارد مانور واحد، فرمان پله و رانش در نرم افزار Adams معرفی گردید و با استفاد از آنها واژگونی در خودرو مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور معیار بررسی پایداری برای جلوگیری از واژگونی شتاب جانبی و زاویه غلت بوده و با استفاده از موارد بیان شده، در یک مطالعه موردی پایداری یک کامیون سه محوره در نرم افزار Adams/car مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مطالعه موردی حاکی از آن است که حداکثر سرعت مجاز برای کامیون سه محوره ۶۰ کیلومتر بر ساعت در پیچ ها بوده و در سرعت های بیشتر استاندارد ISO فراهم نمی گردد.

## مراجع

[1] <http://www.investopedia.com/terms/r/rollover.asp>.

[۲] کرمانی، محمد، علیخانی. مدل سازی دینامیکی واژگونی خودرو. پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۸۹.